

Jan KACPRZAK

## OCENA SPRAWNOŚCI UKŁADU NAPĘDOWEGO ELEKTRYCZNYCH POJAZDÓW TRAKCYJNYCH

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono podstawowe zależności pozwalające na określenie sprawności układu napędowego pojazdu z silnikami prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym i silnikami asynchronicznymi. Oszacowano minimalną wymaganą sprawność układu przekształcania energii pojazdów z silnikami asynchronicznymi

## ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF ELECTRIC TRACTION VEHICLES' DRIVE SYSTEM

**Summary.** Basic equations, which allow describing efficiency of traction vehicles drive system DC series motors, are presented in the paper. The assessment of minimum required efficiency of transformation energy in electric traction vehicles with asynchronous motors is as well enclosed.

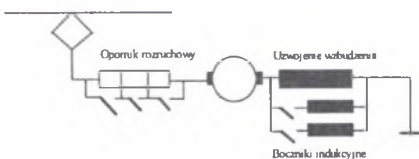
### 1. WPROWADZENIE

Jedną z zasadniczych zalet układów tyrystorowych wprowadzanych do regulacji prędkości pojazdów trakcyjnych jest zmniejszenie zużycia energii potrzebnej do ruchu. Jest to związane z eliminacją strat w układzie rozruchowym pojazdu i możliwością stosowania dość prostych układów hamowania odzyskowego. Inną ważną korzyścią wynikającą ze stosowania tego typu układów jest budowa precyzyjnych układów regulacji prędkości i siły pociągowej rozwijanej przez pojazdy trakcyjne. O ile korzyści wynikające z wprowadzania układów regulacji, także z zastosowaniem układów mikroprocesorowych, są niepodważalne, oszczędności energii pobieranej z układu zasilania, zwłaszcza w przypadku pojazdów z silnikami asynchronicznymi i dwukrotnym przetwarzaniem energii elektrycznej, wydają się dyskusyjne. Wynika to z analizy strat w układzie napędowym pojazdu zależnych od sprawności układu przetwarzania energii i czasu pracy przetworników. Dotyczy to zwłaszcza porównania strat w klasycznym, stycznikowo - opornikowym układzie regulacji prędkości i układzie z trójfazowymi silnikami asynchronicznymi prądu przemiennego. Zasadniczą trudnością w wyznaczeniu strat w układzie napędowym pojazdów z różnym systemem przetwarzania energii jest brak danych dotyczą-

cych energetycznej sprawności energoelektronicznych układów przetwarzania energii, a zwłaszcza falowników napięcia.

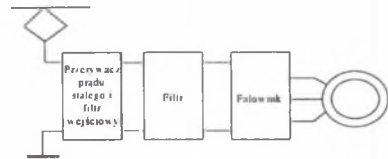
## 2. STRUKTURY UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

Klasyczny układ regulacji prędkości pojazdu trakcyjnego można przedstawić w postaci jak na rys. 1. Przyjęto tu, że regulacja prędkości jest prowadzona za pomocą zmian rezystancji oporników rozruchowych, a następnie za pomocą zmian (zmniejszania) strumienia wzbudzenia silników. W większości rozwiązań istniejących układów napędowych zmniejszanie strumienia jest prowadzone za pomocą styczników włączających, równoległe do uzwojenia wzbudzenia, boczniki indukcyjne. W pojeździe z silnikami prądu stałego i bezopornikową regulacją prędkości elementem regulacyjnym jest tyrystorowy lub tranzystorowy przerywacz prądu stałego. Na wejściu układu znajduje się filtr wejściowy zmniejszający tętnienia prądu pobieranego z sieci trakcyjnej. W tym układzie zmniejszanie strumienia wzbudzenia jest prowadzone, podobnie jak w układzie klasycznym, za pomocą układów stycznikowych. W pojazdach z asynchronicznymi trójfazowymi silnikami prądu przemiennego o zasilaniu z sieci prądu stałego układ przetwarzania energii można przedstawić w postaci jak na rys. 2. Oprócz silnika prądu przemiennego znajduje się falownik, zwykle falownik napięcia, stabilizujący napięcie zasilające, przerywacz prądu stałego oraz zestaw filtru wejściowego i filtru pośredniczącego. Każdy z elementów przetwarzania energii może być scharakteryzowany sprawnością energetyczną zdefiniowaną jako stosunek mocy, otrzymywanej na wyjściu układu do mocy doprowadzanej do wejścia. Ogólna sprawność układu napędowego jest określona iloczynem sprawności poszczególnych elementów, zaś występujące straty energii, sprawnością poszczególnych elementów i czasem ich pracy w okresie jazdy. Czas pracy poszczególnych elementów układu napędowego zależy od przyjętego sposobu przejazdu zadanej drogi.



Rys. 1. Klasyczny klasycznego układu regulacji prędkości pojazdu trakcyjnego

Fig. 1. A scheme of classical control system of speed of a traction vehicle



Rys. 2. Struktura układu przetwarzania energii w pojazdach z silnikiem prądu przemiennego

Fig.2. A structure of energy conversion system of AC driven vehicles

## 3. SPRAWNOŚĆ POJAZDU Z SILNIKAMI PRĄDU STAŁEGO I KLASYCZNYM UKŁADEM REGULACJI PRĘDKOŚCI

W przypadku układu napędowego z silnikami prądu stałego i klasycznym, stycznikowo - opornikowym sposobem regulacji prędkości, w większości rozwiązań, dla zmniejszenia strat

rozruchowych stosuje się przełączanie silników z połączenia szeregowego na równoległe. Moc na „wyjściu” pojazdu można zapisać jako:

$$P_2 = F_p v_p = \eta_z N_s M_s \Omega_s = \eta_z N_s M_{sn} \Omega_{sn} m_s \omega_s$$

gdzie:  $N_s$  - oznacza liczbę silników,  $M_s$  - jest momentem na wale silnika,  $\Omega_s$  - prędkością kątową wału silnika, zaś  $m_s = M_s M_{sn-1}$ ,  $\omega_s = \Omega_s \Omega_{sn-1}$ , przy czym  $M_{sn}$  i  $\Omega_{sn}$  - są znamionowymi wartościami momentu i prędkości kątowej silnika,  $\eta_z$  - sprawnością przekładni. Moc na „wejściu”, czyli moc pobierana z układu zasilania, jest równa:

$$P_1 = U_z I_p = K_s U_z I_s = K_s U_{sn} I_{sn} u_s i_s$$

gdzie:  $U_z$  - jest napięciem zasilania pojazdu,  $I_s$  - prądem silnika,  $K_s$  - uwzględnia sposób połączenia silników (dla czterech silników ( $N_s = 4$ ), połączonych w szereg  $K_s = 4$  zaś dla dwóch równoległych grup silników łączonych po dwa w szereg  $K_s = 2$ ),  $u_s = U_s U_{sn-1}$ , oraz  $i_s = I_s I_{sn-1}$ , przy czym  $U_{sn}$  i  $I_{sn}$  oznaczają znamionowe wartości napięcia zasilania i prądu silnika. Stosunek mocy  $P_2$  i  $P_1$  określa sprawność pojazdu:

$$\eta_p = \frac{P_2}{P_1} = \eta_z \frac{N_s M_{sn} \Omega_{sn} m_s \omega_s}{K_s U_{sn} I_{sn} u_s i_s} = \eta_z \frac{N_s}{K_s} \eta_{sn} \frac{m_s \omega_s}{u_s i_s}$$

gdzie  $\eta_{sn}$  oznacza znamionową sprawność silnika.

Przedstawiając równania opisujące pracę trzech szeregowo połączonych grup silników szeregowych w stanie ustalonym w postaci:

$$U_z = R_{RS} I_s + 6 R_s I_s + 6 \frac{\Delta P_0}{I_s} + 6 c \Phi_w \Omega_s$$

gdzie:  $R_s$  - oznacza rezystancję uzwojeń silnika,  $R_{RS}$  - rezystancję opornika rozruchowego przy szeregowym połączeniu grup silników,  $\Phi_w$  - strumień wzbudzenia silnika i jego wartość znamionowa, zaś  $\Delta P_0$  - straty biegu jałowego. Obowiązuje również zależność:

$$M_s = c \Phi_w I_s$$

Wprowadzając oznaczenia:

$$k_s = \frac{R_s I_{sn}}{U_{sn}}, \quad k_0 = \frac{\Delta P_0}{U_{sn} I_{sn}}, \quad \rho_{RS} = \frac{R_{RS}}{R_s}, \quad \varphi_w = \frac{\Phi_w}{\Phi_{wn}}$$

otrzymuje się:

$$2 u_s = (6 + \rho_{RS}) k_s i_s + 6 (1 - k_s - k_0) \omega_s \varphi_w + 6 \frac{k_0}{i_s} \quad (1)$$

oraz:

$$m_s = \varphi_w i_s \quad (2)$$

Sprawność układu napędowego pojazdu w okresie rozruchu, przy szeregowym połączeniu grup silników, jest zatem równa:

$$\eta_R^S = \left[ 1 - \left( 3 + \frac{1}{2} \rho_{RS} \right) \frac{k_s i_s}{u_s} - 3 \frac{k_0}{u_s i_s} \right] \eta_z \quad (3)$$

gdzie  $i_R = I_R I_{sn-1}$ , zaś  $I_R$  - oznacza zadaną wartość prądu rozruchu silników pojazdu. Znamionowa sprawność silnika jest równa  $\eta_{sn} = 1 - k_s - k_0$ . Wielkość  $\eta_z$  - oznacza sprawność przekładni. Postępując podobnie dla szeregowo - równoległego połączenia grup silników otrzymuje się sprawność układu napędowego:

$$\eta_s^R = \left[ 1 - \frac{k_s i_s}{u_s} \left( \frac{3}{2} + \rho_{RSR} \right) - \frac{3}{2} \frac{k_0}{u_s i_s} \right] \eta_z \quad (4)$$

Dla okresu jazdy przy połączeniu szeregowym trzech grup silników będzie:

$$\eta_s^R = \left[ 1 - \frac{k_s i_s}{u_s} \left( 1 + \frac{3}{2} \rho_{RR} \right) - \frac{k_0}{u_s i_s} \right] \eta_z \quad (5)$$

natomiast dla okresu osłabiania wzbudzenia:

$$\eta_s^B = \left\{ 1 - \frac{k_s i_R}{u_s} \left[ 1 - (1 - \alpha_w) k_w \right] - \frac{k_0}{u_s i_R} \right\} \eta_z \quad (6)$$

gdzie:  $\alpha_w$  jest współczynnikiem wzbudzenia silnika i oznacza stosunek prądu płynącego w uzwojeniu wzbudzenia do prądu silnika, natomiast  $k_w$  oznacza stosunek rezystancji uzwojenia wzbudzenia do rezystancji wirnika maszyny. Podobne zależności otrzymuje się dla układu napędowego pojazdu z czterema przełączalnymi silnikami szeregowymi.

#### 4. SPRAWNOŚĆ PRZEKŁADNI MECHANICZNEJ

Sprawność przekładni mechanicznej wiążącej wał silnika z kołami napędowymi można przedstawić w postaci:

$$\eta_z = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{p_o} + \frac{1 - \eta_{zn}}{\eta_{zn}} - \alpha} \quad (7)$$

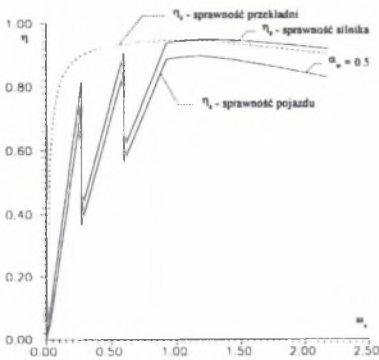
gdzie  $\alpha$  - oznacza stosunek strat stałych w przekładni do znamionowej mocy przekładni  $\eta_{zn}$ , zaś:  $p_o = P_2 P_{2n-1}$  określa stopień obciążenia przekładni. Dla  $p_o = 1$ , co odpowiada znamionowemu obciążeniu przekładni, otrzymuje się:  $\eta_z = \eta_{zn}$ .

## 5. ZMIANY SPRAWNOŚCI POJAZDU Z SILNIKAMI PRĄDU STAŁEGO

Na rys. 3 przedstawiono obliczone z podanych wyżej zależności zmiany sprawności przekładni, silników trakcyjnych oraz sprawność układu napędowego pojazdu z sześcioma silnikami i układem rozruchu z wykorzystaniem układów stycznikowo - opornikowych, równą:  $\eta_p = \eta_z \eta_s$ . Do obliczeń przyjęto:  $k_s = 0.03$ ,  $k_\theta = 0.03$ ,  $k_w = 0.5$ ,  $\alpha_w = 0.5$ ,  $i_R = 1.3029$ , oraz  $\eta_{sm} = 0.94$  i aproksymację charakterystyki magnesowania silnika o postaci:

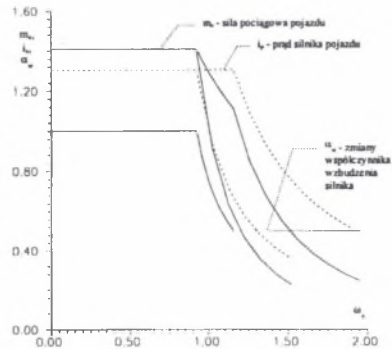
$$\varphi = \frac{(1+a)\alpha_w i_s}{1 + a\alpha_w i_s}$$

gdzie  $a = 2.1$ . Przy obliczaniu zmian sprawności przekładni mechanicznej przyjęto znamionową sprawność przekładni  $\eta_{sm} = 0.94$  oraz  $\alpha = 0.03$ . Na rys. 4 przedstawiono natomiast obliczoną charakterystykę trakcyjną pojazdu (podaną w jednostkach względnych, to jest w odniesieniu do znamionowych parametrów układu napędowego pojazdu).



Rys. 3. Zmiany sprawności układu napędowego pojazdu

Fig.3. Efficiency curve of a vehicle drive system



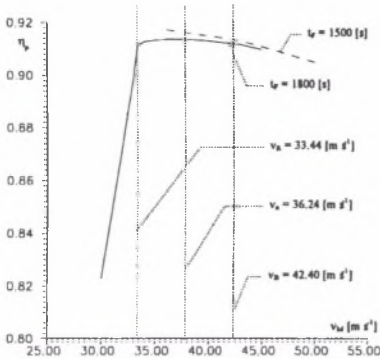
Rys. 4. Charakterystyka trakcyjna pojazdu w jednostkach względnych

Fig.4. Relative traction characteristic of a vehicle

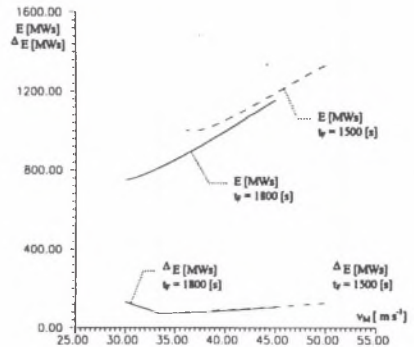
## 6. WYNIKI OBLICZEŃ SPRAWNOŚCI POJAZDU NA ZADANEJ TRASIE

Do obliczeń przyjęto pojazd o następujących parametrach: masa  $m_p = 168$  [t], przyspieszenie rozruchu  $a_R = 0.4$  [ $m s^{-2}$ ], opóźnienie hamowania równe  $a_H = 0.4$  [ $m s^{-2}$ ] (hamowanie mechaniczne), przeciążalność silników w okresie rozruchu:  $A_R = 1.3$ ,  $k_s = 0.03$ ,  $k_\theta = 0.03$ ,  $k_w = 0.5$ , minimalna wartość współczynnika wzbudzenia  $\alpha_w = 0.5$ , liczba silników  $N_s = 4$ , znamionowa sprawność silnika  $\eta_{sm} = 0.94$ . Moc układu napędowego określono dla zadanych warunków rozruchowych [1], to jest z warunku uzyskania zadanego przyspieszenia rozruchu i maksymalnej prędkości jazdy  $v_M$ . Dla prostoty przyjęto tu stałą wartość sprawności prze-

kładni  $\eta_z = 1.0$ . Na rys. 5 i 6 przedstawiono obliczenia średniej wartości sprawności układu napędowego pojazdu oraz zmiany energii potrzebnej do ruchu i strat w układzie napędowym w funkcji zadanej maksymalnej prędkości jazdy. Przyjęto tu pojazd o mocy dostosowanej do jazdy z prędkością  $v_{M^*} = 50 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$  oraz zadany czas przejazdu  $t_F = 1500 \text{ [s]}$  i  $t_F = 1800 \text{ [s]}$ . Z przedstawionych na rys. 5 wyników obliczeń otrzymuje się, że dla zadanej drogi  $s_F = 50 \text{ km}$  i zadanego czasu jazdy średnia wartość sprawności układu napędowego jest uzyskiwana dla zadanej, maksymalnej prędkości jazdy  $v_M$  równej znamionowej prędkości  $v_n$ .



Rys. 5. Zmiany średniej sprawności układu napędowego dla różnych wartości czasu przejazdu  $t_F$  w funkcji maksymalnej prędkości jazdy  $v_M$   
 Fig.5. Changes of average efficiency of a drive system for a different time of running  $t_F$  as a function of maximum speed  $v_M$



Rys. 6. Zmiany energii potrzebnej do jazdy i strat w układzie napędowym w funkcji maksymalnej prędkości jazdy. Przyjęto  $s_F = 50 \text{ km}$   
 Fig.6. Changes of required for running energy and losses in a drive system as a function of maximum speed (assumed:  $s_F = 50 \text{ km}$ )

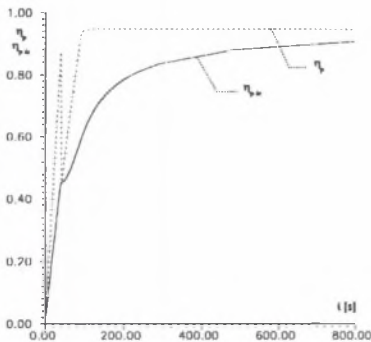
Dla tej prędkości straty w układzie napędowym uzyskują wartość minimalną (rys. 6). Oznacza to, że z punktu widzenia strat jazda z wykorzystaniem okresu bocznikowania silników i naturalnej charakterystyki silników nie jest korzystna. Na rys. 7 pokazano chwilowe zmiany sprawności  $\eta_p$  i zmiany średniej sprawności układu napędowego  $\eta_{p\bar{s}}$ . Rys. 8 przedstawia zmiany sprawności pojazdu w funkcji zadanego czasu jazdy dla różnych wartości zadanych maksymalnych prędkości jazdy  $v_M$ . Przyjęto  $s_F = 50 \text{ km}$  oraz moc silników pojazdu odpowiadającą maksymalnej prędkości jazdy równej  $v_{M^*}$ . Z podanych obliczeń wynika, że dla małych maksymalnych prędkości jazdy  $v_M$  (w stosunku do prędkości  $v_{M^*}$ ) znacznie zmniejsza się średnia za czas jazdy sprawność pojazdu. Szczególnie jest to widoczne dla przypadku wykorzystania pojazdu o mocy dobranej do jazdy z maksymalną prędkością  $v_M = 50 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$  i jeździe z prędkością  $v_M = 30 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$ . Całkowite zużycie energii potrzebnej do jazdy jest równe  $E = 1332.9 \text{ [MWs]}$ , straty energii w układzie są równe  $\Delta E = 125.16 \text{ [MWs]}$ . W przypadku poprawnego doboru mocy pojazdu do zadanych warunków ruchowych średnia wartość sprawności pojazdu z układem stycznikowo - opornikowym osiąga duże wartości.

## 7. SPRAWNOŚĆ SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO

W literaturze technicznej aproksymacje zmian sprawności silnika asynchronicznego dla różnych wartości napięć zasilających i różnych częstotliwości są podawane niezmiernie rzadko. W pracy [2] przedstawiono aproksymację zmian sprawności silnika w postaci:

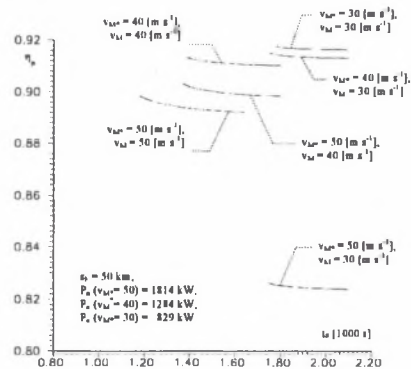
$$\eta_{SA} = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_{Cu} \frac{f_n}{f_1} + \Delta P_h + \Delta P_w \frac{f_1}{f_{1n}} + \Delta P_0 \frac{M_n}{M} \sqrt{\frac{f_1}{f_{1n}}}} \quad (8)$$

gdzie oznaczono:  $P_n$  - znamionową moc silnika,  $\Delta P_{Cu}$  - straty w miedzi przy znamionowym obciążeniu,  $\Delta P_h$  - straty na histerezę przy znamionowym obciążeniu,  $\Delta P_w$  - straty na prądy wirowe przy znamionowym obciążeniu,  $\Delta P_0$  - straty mechaniczne przy znamionowym obciążeniu,  $f_{1n}$  - znamionowa częstotliwość napięcia zasilania,  $f_1$  - częstotliwość napięcia zasilającego,  $M_n$  - znamionowy moment silnika. Podobnie jak wyżej zakłada się, że silnik jest zasilany napięciem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości  $f_1$ . Odnosząc wartości strat w silniku do znamionowej mocy  $P_n$  otrzymuje się:



Rys.7. Zmiany sprawności pojazdu w funkcji czasu jazdy

Fig.7. Changes of efficiency of a vehicle as a function of time of running



Rys.8. Zmiany sprawności pojazdu w funkcji zadanego czasu jazdy

Fig.8. Changes of efficiency of a vehicle as a function of assumed time of running

$$\eta_{SA} = \frac{1}{1 + k_s \frac{1}{\phi} + k_h + k_w \phi + k_0 \frac{1}{m} \sqrt{\phi}} \quad (9)$$

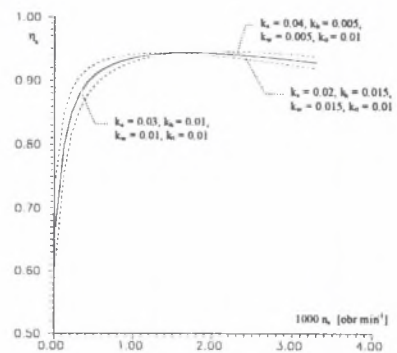
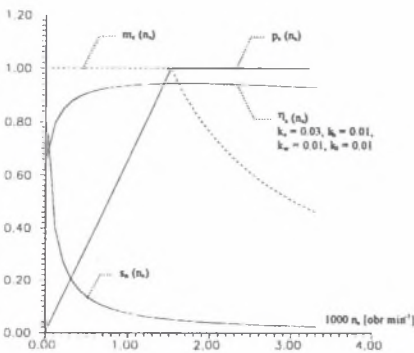
gdzie oznaczono:

$$m = \frac{M}{M_n}, \quad \phi = \frac{f_1}{f_{1n}}, \quad k_s = \frac{\Delta P_{Cu}}{P_n}, \quad k_h = \frac{\Delta P_h}{P_n}, \quad k_w = \frac{\Delta P_w}{P_n}, \quad k_0 = \frac{\Delta P_0}{P_n}$$

Na rys. 9 pokazano obliczone charakterystyki i zmiany sprawności silnika. Do obliczeń przyjęto: znamionową częstotliwość napięcia zasilania silnika  $f_{in} = 80$  Hz, znamionowy poślizg maszyny  $s_n = 0.05$ , poślizg krytyczny maszyny  $s_k = 0.15$ , liczbę par biegunów maszyny  $p = 3$ . Założono także, że częstotliwość napięcia zasilającego może się zmieniać się w zakresie  $0 < f_i < 160$  Hz. Przyjęto zatem, że w przedziale częstotliwości  $0 < f_i < 80$  Hz silnik winien rozwijać stałą wartość momentu rozruchowego, co odpowiada klasycznemu rozruchowi w pojazdach z silnikami prądu stałego, zaś w przedziale częstotliwości  $80 \text{ Hz} < f_i < 180$  Hz silniki pojazdu rozwijają stałą moc, co odpowiada okresowi bocznikowania silników o wzbudzeniu szeregowym. Przyjęto tu, że dla znamionowych warunków pracy:

$$k_s = \frac{\Delta P_{Cu}}{P_n} = 0.03, \quad k_h = \frac{\Delta P_h}{P_n} = 0.01, \quad k_w = \frac{\Delta P_w}{P_n} = 0.01, \quad k_0 = \frac{\Delta P_0}{P_n} = 0.01$$

co odpowiada warunkowi równości strat obciążeniowych i strat jałowych dla znamionowego obciążenia maszyny. Na rys. 10 pokazano przebiegi sprawności maszyny dla różnych wartości współczynników  $k_s$ ,  $k_h$ ,  $k_w$  i  $k_0$ .



Rys. 9. Zmiany poślizgu  $s_n$ , momentu obrotowego  $m_s$ , mocy na wale  $p_s$ , oraz sprawności  $\eta_s$  w funkcji prędkości obrotowej silnika

Fig.9. Changes of slip  $s_n$ , rotational torque  $m_s$ , power atg axle  $p_s$ , and efficiency  $\eta_s$ , as a function of rotational speed of motor

Rys. 10. Zmiany sprawności asynchronicznego silnika w funkcji prędkości kątowej dla różnych wartości współczynników  $k_s$ ,  $k_h$ ,  $k_w$  i  $k_0$

Fig.10. Changes of efficiency of asynchronous motor as a function of rotational speed for different values of coefficients:  $k_s$ ,  $k_h$ ,  $k_w$  and  $k_0$

## 8. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

Przyjmując parametry układu napędowego jak w p. 6, dla zadanej drogi  $s_F = 50$  km i zadanego czasu przejazdu  $t_F = 1500$  s otrzymuje się średnią wartość sprawności pojazdu z asynchronicznymi silnikami równą  $\eta_{pA} = 0.9232$ . Energia potrzebna do jazdy jest równa  $E = 1306.2$  [MWs], zaś straty  $\Delta E = 100.3$  [MWs]. Zmniejszenie, w stosunku do klasycznego rozwiązania układu napędowego, energii potrzebnej do ruchu wynika z większych wartości sił



rozwijanych w okresie jazdy ze stałą mocą. Przyjęto, że znamionowej częstotliwości napięcia zasilającego silniki odpowiada, podobnie jak dla pojazdu z silnikami prądu stałego, znamionowa prędkość pojazdu równa  $v_{\text{pnn}} = 36.24 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$ , natomiast siła rozruchowa jest równa  $F_R = 70.5 \text{ kN}$ . Przyjęto tu, że podobnie jak w p. 6 pojazd jedzie według schematu: rozruch ze stałą siłą - rozruch ze stałą mocą - stała prędkość - wybieg - hamowanie. Podobnie jak poprzednio założono stałą wartość przekładni mechanicznej  $\eta_z = 1$ . Pominięto sprawność układu przekształcania energii na pojeździe. Z porównania strat występujących podczas obu przejazdów wynika, że przy założeniu równej wartości strat towarzyszących przejazdowi zadanej drogi w zadanym czasie i podobnych wartościach przyspieszenia rozruchu i opóźnienia hamowania straty w układzie przekształcania energii na pojeździe z silnikami asynchronicznymi nie powinny przekroczyć wartości  $\Delta E = 24.86 \text{ [MWs]}$ , co odpowiada średniej sprawności układu przekształcania energii równej  $\eta_F = 0.9813$ . Jest to wartość dość duża i trudna do uzyskania w warunkach dwustopniowego przekształcania energii (rys.2). Wymagana jest bowiem średnia sprawność obu przekształtników (przerywacz prądu stałego i falownik) bliska 99 %.

## 9. PODSUMOWANIE

Z podanych szacunkowych obliczeń energii potrzebnej do ruchu, strat i sprawności układu napędowego pojazdu z klasycznym układem regulacji prędkości i silnikami prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym oraz pojazdu z silnikami asynchronicznymi i przekształcaniem napięcia stałego na przemienne trójfazowe wynika, że dla porównywalnych energetycznych wskaźników przejazdu wymagana jest dość duża średnia (za okres jazdy) sprawność układu przekształcania energii. Podawane przez producentów sprawności przekształtników dotyczą zwykle znamionowego punktu pracy przekształtnika. Dla obciążeń różnych od znamionowego sprawności są zwykle znacznie mniejsze.

Z tego punktu widzenia wprowadzanie układów napędowych z silnikami prądu przemiennego dla pociągów dalekobieżnych z niewielką liczbą rozruchów wydaje się być, mimo znacznych zalet eksploatacyjnych, dyskusyjne. Dokładne obliczenia energetycznych wskaźników pracy pojazdów z silnikami asynchronicznymi mogą być prowadzone dla znanych zmian sprawności układu przekształcania energii, to jest zmian sprawności w funkcji napięcia wyjściowego, prądu obciążenia i częstotliwości.

## LITERATURA

1. Kacprzak J.: Teoria trakcji elektrycznej. Materiały do projektowania. OW PW, Warszawa 1996.
2. Kostienko M.R.: Elektricheskie masziny. Specjalnaja czast. GEI, Moskwa 1949.

**Abstract**

A basic advantage of thyristor circuits used for decontrol of traction vehicles is reduction of energy required for running of vehicles. It is resulted from elimination of losses during starting and opportunity of easy application of regenerative braking. Nevertheless, performed estimation calculations of demanded energy, losses and efficiency of a drive system of a vehicle shown, that savings of energy delivered by a supply system, especially for AC driven vehicles and double energy transformation, are not significant.

From that point of view implementation of drive systems with AC motors, for longdistance trains with few stopping, seems to be, even taking into account service advantages, questionable. Precise calculations of energy factors of running of vehicles with AC motors may be undertaken for known changes of efficiency of transmission energy system, i.e. for changes of efficiency as a function of output voltage, current of load and frequency.